

На правах рукописи



Кулеш Никита Александрович

МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ И МАГНИТОУПРУГИЕ
ЭФФЕКТЫ АМОРФНЫХ ПЛЕНОК С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ
КОМПОНЕНТАМИ И ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ИХ
ОСНОВЕ

01.04.11 – Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург - 2014

Работа выполнена на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов и в отделе магнетизма твердых тел НИИ физики и прикладной математики ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».


- Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор,
Васьковский Владимир Олегович
- Официальные оппоненты:** **Эдельман Ирина Самсоновна**,
доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных явлений
Миляев Михаил Анатольевич,
кандидат физико-математических наук, ФГБУН Институт физики металлов УрО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории электрических явлений
- Ведущая организация:** ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится «18» декабря 2014 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.24 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, зал заседаний диссертационных советов, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент

 Овчинников А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Аморфные пленки сплавов редкоземельных (RE) и переходных 3d-металлов (TM) на протяжении нескольких десятилетий [1] являются объектом исследований с переменной степенью интенсивности. В отличие от кристаллических материалов с заданной стехиометрией, аморфным сплавам свойственна практически неограниченная взаиморастворимость компонентов, что позволяет прецизионным образом варьировать свойства получаемых материалов. Кроме того, для пленок сплавов RE-TM, в силу существенно различающихся атомных радиусов элементов, аморфное состояние получается естественным путем без внесения дополнительных аморфизаторов.

Важный этап в исследовании аморфных плёнок был связан с поиском среды для магнитооптической записи информации с использованием цилиндрических доменов. Для этих целей было необходимо определённое соотношение ряда физических параметров, таких как намагниченность, температура магнитного упорядочения, величина магнитооптического эффекта Керра, коэрцитивная сила, характеристики магнитной анизотропии [2]. Все это обусловило выбор пленок на основе сплавов Gd, Tb, Fe и Co в достаточно узкой области составов [3,4]. Однако с развитием более перспективных принципов магнитной и оптической записи информации количество работ в этом направлении сократилось.

С открытием эффектов гигантского и туннельного магнитосопротивления и появлением практического интереса к средам с однонаправленной анизотропией оказался востребованным потенциал пленок Tb-Co как источника внутреннего магнитного смещения [5]. В частности, слоистые структуры на основе таких пленок могут быть использованы в качестве чувствительной среды датчиков, принцип действия которых основан на регистрации изменений направления и напряженности магнитного поля. При этом стоит отметить, что в подавляющем большинстве случаев, как и в ранних работах [6], исследовались и предлагались для использования плёночные среды, содержащие слои Tb-Co с так называемой перпендикулярной магнитной анизотропией, которая, как правило, обуславливает повышенный гистерезис в прилегающих ферромагнитных слоях. Тем не менее, можно констатировать смещение научных интересов в сторону относительно тонких плёнок

RE-TM, входящих в состав плёночных структур с однонаправленной магнитной анизотропией.

Интерес к слоистым пленкам на основе Tb-Fe и Tb-Co имеет и другой источник. Он связан с разработкой исполнительных микромеханизмов и резонаторов [7], а так же искусственных функциональных сред, объединяющих в себе магнитострикционные и пьезоэлектрические эффекты [8]. Для подобных приложений важным аспектом является относительно небольшое поле магнитного насыщения при достаточно высокой магнитострикции [9]. Реализация такого сочетания свойств требует детального изучения магнитной структуры аморфных плёнок, содержащих высокоанизотропные редкоземельные ионы (в частности, тербий и диспрозий), и также видится вне рамок перпендикулярной магнитной анизотропии.

Степень разработанности темы. В научной литературе существует значительное количество работ, посвященных исследованию природы перпендикулярной магнитной анизотропии, а так же магнитных и магнитооптических свойств аморфных пленок типа RE-TM, содержащих Tb, Gd, Co, Fe (Т. Мизогучи, С. Окаmine, П. Хансен). В работах Н. Смита и В.С. Кейна для случая обменносвязанных слоев магнитомягкого сплава 3d- металлов и аморфного ферритмагнетика с перпендикулярной анизотропией Tb-Co разработана микромагнитная модель, объясняющая образование обменного смещения. В ряде работ была выполнена оптимизация функциональных свойств сред с повышенной магнитострикцией (на основе системы Tb-Co и Fe-Co), в том числе рассмотрены вопросы снижения поля магнитного насыщения и возможности применения многослойных структур.

Учитывая смещение практического интереса к аморфным пленкам RE-TM (прежде всего Tb-Co) в сторону использования их в качестве источников однонаправленной анизотропии в прилегающих ферромагнитных слоях или повышенной магнитострикции, нами были сформулированы соответствующие цель и задачи работы, направленные на изучение магнитных свойств пленок и плёночных структур на основе системы Tb-Co с одноосной магнитной анизотропией в плоскости образцов.

Цель и задачи работы. Целью работы стало установление особенностей магнитной структуры, условий образования и

характеристик M -наведённой магнитной анизотропии в аморфных плёнках с редкоземельными компонентами и влияния этих свойств на закономерности перемангничивания обменносвязанных плёночных структур, содержащих аморфные слои типа Tb-Co и слои 3d-металлов. Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи:

1) разработка методик неразрушающего элементного анализа и определения эффективных атомных магнитных моментов компонентов в тонких плёнках, включающих редкоземельные и 3d-переходные металлы;

2) определение характера и закономерностей трансформации в магнитном поле магнитной структуры аморфных плёнок, содержащих редкоземельные ионы с сильно отличающейся симметрией электронных оболочек;

3) установление основного источника наведённой магнитной анизотропии в аморфных плёнках Tb-Co путём варьирования условий получения, состава образцов и температуры;

4) изучение влияния магнитных и немагнитных прослоек на гистерезисные свойства обменносвязанных плёночных структур с однонаправленной анизотропией, содержащих аморфный слой Tb-Co в качестве источника магнитного смещения;

5) создание методики прецизионного анализа профиля элементного состава в слоистых плёночных структурах на основе 3d-переходных металлов;

6) исследование и поиск способов повышения термической устойчивости гистерезисных свойств магнитомягкого слоя в составе плёночных структур типа $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb-Co}$.

Научная новизна.

1. Впервые показано, что условия получения аморфных плёнок Tb-Co влияют на спонтанную намагниченность подрешётки тербия в основном состоянии, что связано с наличием сперимагнитного упорядочения, параметры которого отражают тонкие особенности атомной структуры.

2. Экспериментально установлено, что аморфные плёнки RE-Co ($\text{RE}=\text{Gd}, \text{Tb}$) в основном состоянии обладают значительной магнитной восприимчивостью в высоких полях. Процесс высокополевого намагничивания связывается с деформацией магнитной структуры, которая имеет определённую специфику в плёнках, содержащих разные редкоземельные элементы.

3. Представлено экспериментальное обоснование одноионного механизма наведённой магнитной анизотропии в аморфных плёнках Tb-Co. Выдвинуто предположение о наличии в рентгеноаморфных образцах определённого атомного упорядочения, которое формируется с участием обменного взаимодействия осаждающихся атомов с намагниченной плёнкой и обеспечивает магнитную анизотропию.

4. Впервые установлено, что магнетизм тербиевой подсистемы ферромагнитного слоя оказывает определяющее влияние на эффективность межслойной связи в пленках ТМ/Tb-Co (ТМ=Co, Fe₂₀Ni₈₀), что интерпретируется как свидетельство преобладающей роли 3d-Tb обменных взаимодействий в формировании указанной связи.

5. Впервые установлена прямая корреляция между изменением гистерезисных свойств и межслойной диффузией в плёночных структурах типа Fe₂₀Ni₈₀/Tb-Co при термообработке. Показано, что введение прослойки Ti затрудняет диффузию, что рассматривается как способ повышения термической устойчивости функциональных характеристик подобных сред при их практическом использовании.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в работе результаты развивают представления о магнетизме аморфных плёнок RE-TM и плёночных структур на их основе. Они могут быть использованы при разработке магниторезистивных сред типа Fe₂₀Ni₈₀/Tb-Co с внутренним магнитным смещением и оптимизации их функциональных характеристики, в частности, за счёт введения магнитных и немагнитных прослоек. Данные по влиянию физико-технологических факторов на наведённую магнитную анизотропию пленок Tb-Co могут быть полезны для оптимизации процесса получения соответствующих слоев с заданными характеристиками.

Методология и методы исследования. В работе исследовались пленочные образцы с одним (La_xCo_{100-x}, Gd_xCo_{100-x}, Tb_xCo_{100-x}), двумя (Fe₂₀Ni₈₀/Tb-Co, Co/Tb-Co, Fe₂₀Ni₈₀/Ti/Tb-Co) и тремя (Fe₂₀Ni₈₀/Co/Tb-Co) магнитными слоями, полученные методами магнетронного и высокочастотного ионного распыления на стеклянных подложках. Аттестация структурного состояния пленочных объектов проводилась на рентгеновском дифрактометре, определение элементного состава – с использованием рентгенофлуоресцентного анализа на полном внешнем отражении (TXRF), исследование межслойной диффузии – методом

рентгено-флуоресцентного анализа в скользящих углах падения первичного пучка (GIXRF). Для измерения магнитных свойств при комнатной температуре использовался вибрационный магнитометр, в интервале от 5 до 350 К – СКВИД магнитометр.

Степень достоверности и апробация результатов.

Обоснованность результатов достигается за счёт применения современных технологий для получения плёночных объектов исследования, их всесторонней структурной аттестации, использованием современного высокоточного исследовательского оборудования, согласованием полученных результатов с уже имеющимися в литературе данными, представлением и обсуждением результатов на научных мероприятиях разного уровня, а так же их опубликованием в рецензируемых научных международных и российских журналах.

Материалы диссертационной работы были представлены на 19 научных конференциях: всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества – 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 (Екатеринбург, Россия); Физические свойства металлов и сплавов – 2009, 2011, 2013 (Екатеринбург, Россия); Euro-Asian Symposium Trends in Magnetism - 2010 (Екатеринбург, Россия); 2013 (Владивосток, Россия); Moscow International Symposium on Magnetism – 2011, 2014 (Москва, Россия); Совещание по физике низких температур - 2012 (Санкт-Петербург, Россия); Joint European Magnetic Symposia - 2012 (Парма, Италия), 2013 (Родос, Греция); Международная конференция Новое в магнетизме и магнитных материалах – 2012 (Астрахань, Россия); Школа «Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и наноиндустрии» - 2013 (Екатеринбург, Россия); Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых – 2013 (Ижевск, Россия); The European Conference PHYSICS OF MAGNETISM - 2014 (Познань, Польша).

Публикации и личный вклад автора

По теме работы опубликовано 9 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 29 тезисов докладов. Список публикаций приведен в конце автореферата. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, методическом обеспечении экспериментов,

проведении измерений, обсуждении и описании полученных результатов во всех работах, опубликованных в соавторстве.

Использованные в исследовании пленочные образцы получены Лепаловским В.Н. и Балымовым К.Г. в отделе магнетизма твердых тел НИИ ФПМ ИЕН УрФУ, рентгенограммы измерены в университете Страны Басков, Бильбао, Испания.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка цитируемой литературы. Объем составляет 143 страниц, включая 85 рисунков. Общий список цитированных источников насчитывает 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено краткое обоснование актуальности темы исследования, выполнена постановка цели и задач работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы. В ней приведено краткое описание особенностей магнитной структуры бинарной системы RE-TM в кристаллическом и аморфном состояниях, рассмотрены основные этапы и результаты исследования природы магнитной анизотропии аморфных пленок на основе RE-TM. Рассмотрены некоторые возможности и проблемы использования пленок определённых составов как сред, обладающих высокими гистерезисными и магнитоупругими свойствами. В заключительной части приведено описание двухслойных плёнок с однонаправленной анизотропией на основе ферромагнитных слоев RE-TM. Дано описание микромагнитной модели, объясняющей появление магнитного смещения в магнитомягком ферромагнитном слое как результата взаимодействия с прилегающим магнитотвёрдым ферромагнитным слоем с перпендикулярной анизотропией.

Во второй главе описана методика получения образцов, исследованных в данной работе, перечислены методы, использованные при аттестации их магнитных свойств, элементного состава и структуры.

Однослойные пленки Tb-Co и Gd-Co были получены высокочастотным и магнетронным ионным распылением, плёнки La-Co и слоистые структуры типа $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb-Co}$ – методом высокочастотного распыления. Ось легкого намагничивания (ОЛН) в плоскости плёнок задавалась путем приложения внешнего

(технологического) магнитного поля во время осаждения образцов. Для защиты слоев RE-TM от окисления применялись слои Ti толщиной 10 нм, толщины основных слоев составляли 100 нм для RE-TM и 50 нм для $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, слои RE-Co находились в аморфном, пермаллой – в нанокристаллическом состоянии.

Помимо общей характеристики образцов и использованных методов, приведено описание методик, разработанных нами для проведения неразрушающего элементного анализа пленочных структур методами TXRF и GIXRF. Прецизионное определение состава пленок RE-Co являлось необходимым условием для расчета средних атомных магнитных моментов (глава 3) и было труднодостижимо с использованием других методов из-за малого количества вещества. Методика GIXRF была использована для анализа межслойной диффузии в двухслойных структурах, который так же являлся сложной задачей из-за малой толщины области перемешивания слоев.

Третья глава посвящена исследованию магнитной структуры и магнитной анизотропии однослойных пленок RE-Co. В этой части работы значительное внимание уделено аморфным плёнкам Tb-Co, как источникам определённой функциональности многослойных плёночных структур. При этом важными являлись особенности свойств, в частности, магнитной структуры, которые могут отразиться на эффективности обменного контакта слоя Tb-Co с ферромагнитными слоями. Понимание принципов формирования магнитной структуры таких пленок требуют уточнения по вопросам соотношения между локальной и макроскопической составляющими магнитной анизотропии, роли магнитоупругих взаимодействий в формировании магнитной анизотропии, влияния технологических факторов на параметры магнитной структуры реальных плёнок.

В данной главе описаны результаты применения известной методики определения средних атомных магнитных моментов редкоземельного компонента (μ_{RE}) из данных по спонтанной намагниченности основного состояния. При этом для установления влияния редкоземельного окружения на величину среднего магнитного момента атомов кобальта (μ_{Co}), нами исследовалась система $\text{La}_x\text{Co}_{100-x}$ с немагнитным RE. Для неё и других бинарных систем принималось линейное изменение плотности в зависимости от состава между значениями, свойственными соответствующим металлам. Полученная зависимость $\mu_{\text{Co}}(x)$ показана на рис. 1. Она применялась для анализа

свойств плёнок с магнитными RE. Кроме того, для плёнок Gd_xCo_{100-x} использовалось представление о коллинеарной ферромагнитной структуре, тогда как в плёнках Tb_xCo_{100-x} предполагалось сперимагнитное упорядочение.

В результате найдено, что μ_{Gd} не зависит от состава, а его значение близко к $7 \mu_B$, то есть совпадает с величиной магнитного момента свободного атома. Это соответствует литературным данным и свидетельствует об адекватности использованной методики. μ_{Tb} ведёт себя иначе. Его величина уменьшается с увеличением x , причём различным образом для плёнок, полученных разными методами (рис. 2). Это связывается со сперимагнитной структурой плёнок Tb-Co, в рамках которой происходит увеличение угла раскрытия тербиевой подрешётки с ростом x и уменьшение её результирующей намагниченности.

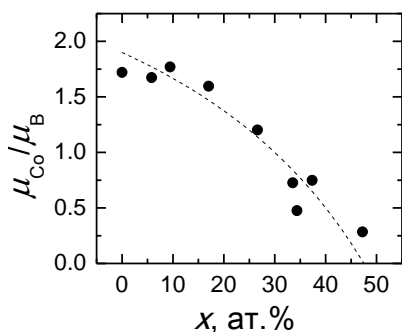


Рис. 1 – Концентрационные зависимости среднего магнитного момента атомов Co для плёнок La_xCo_{100-x} : точки – экспериментальные данные; линия – расчёт, выполненный по эмпирической формуле [10].

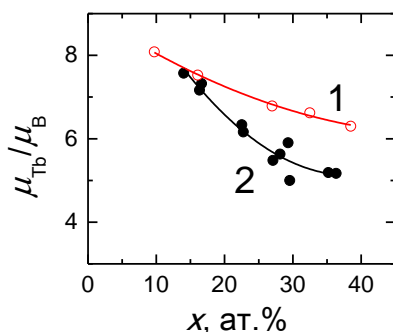


Рис. 2 – Концентрационные зависимости среднего атомного магнитного момента Tb в пленках Tb_xCo_{100-x} полученных магнетронным (1) и высокочастотным (2) распылением.

Необычен тот факт, что значение средней проекции магнитного момента Tb оказалось зависящим от способа получения образцов. Отсюда следует, что локальная анизотропия Tb, носящая одноионный характер и приводящая к сперимагнетизму, весьма чувствительна к тонким вариациям структурного состояния, которые, по-видимому, имеют место в образцах, полученных разными способами. Как уже отмечалось выше, данный результат отражает особенности формирования тербиевой магнитной подрешётки и поэтому проявляется на полевых зависимостях намагниченности $M(H)$ (рис. 3) и

концентрационных зависимостях спонтанной намагниченности $M_s(x)$ пленок (рис. 4).

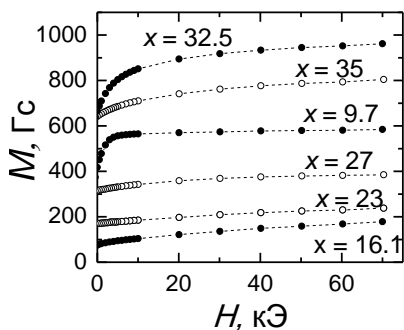


Рис. 3 – Нисходящие ветви петель гистерезиса плёнок Tb_xCo_{100-x} , полученных магнетронным (тёмные точки) и ионно-плазменным (светлые точки) распылением, измеренные вдоль ОЛН при 5 К.

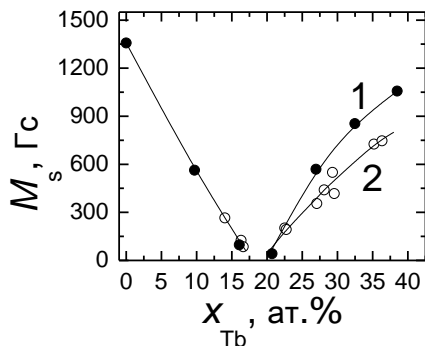


Рис. 4 – Зависимости спонтанной намагниченности от состава плёнок Tb_xCo_{100-x} , полученных магнетронным (тёмные точки) и ионно-плазменным (светлые точки) распылением, измеренные при 5 К.

Анализируя рис. 3, необходимо отметить, что наличие значительной магнитной восприимчивости в больших полях, которую демонстрируют плёнки Tb-Co, вполне ожидаемо. В силу малости парапроцесса наблюдаемый рост намагниченности с полем естественно связать с изменением угла раствора веера в сперимагнитной структуре. Однако различный характер поведения кривых $M(H)$ на начальном этапе намагничивания для образцов разного состава свидетельствует о более сложной ситуации. По нашему мнению, которое подкреплено прямыми наблюдениями магнитного рельефа поверхностей плёнок, существенно нелинейные участки на зависимостях $M(H)$ в основном связаны с намагничиванием в рамках стохастической магнитной структуры. Она представляет собой магнитные неоднородности с характерным размером элементов около 0,5 мкм.

Значительная часть главы 3 посвящена изучению влияния состава, температуры и технологических факторов на магнитную анизотропию пленок Tb-Co. Основной целью данного исследования являлось выяснение природы и особенностей формирования наведенной магнитной анизотропии в плоскости образцов. Принимая во внимание результаты по перемагничиванию образцов Tb-Co разного состава при различных температурах, часть из которых представлена на рис. 5, а также литературные данные, можно заключить, что

магнитная анизотропия этих объектов имеет комплексный характер и включает в себя несколько основных составляющих, в том числе анизотропию формы, перпендикулярную анизотропию, обусловленную анизотропной микроструктурой, флуктуирующую локальную анизотропию ионов тербия и *M*-наведённую анизотропию. Последняя представляет наибольший интерес как с точки зрения механизма образования, так и в плане формирования функциональных свойств плёночных сред. В этой связи нами было проведено специальное исследование, направленное на выявление факторов, оказывающих существенное влияние на наведённую анизотропию. При этом мы исходили из двух наиболее вероятных источников анизотропии: одноосные растягивающие напряжения в плоскости плёнок и одноионная анизотропия Tb.

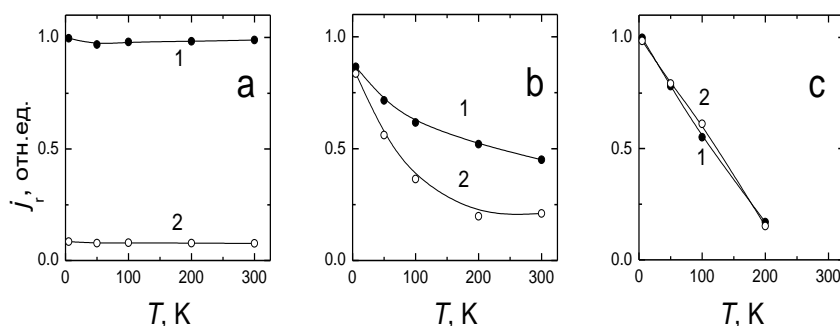


Рис. 5 – Температурные зависимости приведенной остаточной намагниченности пленок Tb₁₇Co₇₃ (a), Tb₂₉Co₇₁ (b), Tb₃₈Co₆₂ (c). Значения j_r определены после намагничивания в поле напряжённостью 70 кЭ вдоль (кривые 1) и перпендикулярно (кривые 2) оси приложения технологического поля.

В серии сравнительных экспериментов были получены образцы при наличии и отсутствии: внешнего магнитного поля, деформации подложки, полимерного покрытия, высокочастотного электрического смещения на подложке. В результате комплексного анализа магнитных свойств этих образцов было показано, что наведенная магнитная анизотропия имеет немагнотострикционную природу. При этом основным условием реализации магнитной анизотропии в плоскости образца является наличие магнитного поля при осаждении пленки. В итоге был сделан вывод, что наведенная магнитная анизотропия пленок Tb-Co является *M*-наведённой, и в то же время имеет

одноионной характер. Это предполагает своеобразную текстуру в электронных конфигурациях атомов Tb, которая формируется в результате взаимодействия осаждающихся атомов с намагниченной поверхностью плёнки.

В четвертой главе рассмотрены свойства обменносвязанных структур с однонаправленной анизотропией на основе магнитомягких слоёв $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ или Co и магнитотвёрдого ферримагнитного слоя Tb-Co – источника внутреннего магнитного смещения. При этом состав Tb-Co выбирался так, чтобы при комнатной температуре в его магнитной структуре преобладала тербиевая подрешетка.

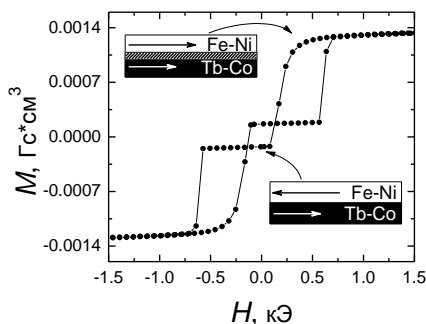


Рис. 6 – Полная петля гистерезиса, измеренная на образце $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb}_{28}\text{Co}_{72}$ вдоль ОЛН при $T = 300$ К. Вставки показывают направления намагниченности в слоях.

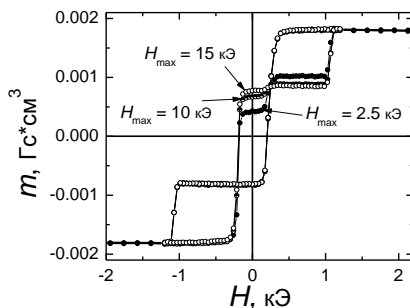


Рис. 7 – Полные петли гистерезиса, измеренные вдоль ОЛН на образце $\text{Co}/\text{Tb}_{27}\text{Co}_{73}$ при $T = 300$ К в полях разной амплитуды H_{max} .

На рис. 6 и рис. 7 приведены зависимости магнитного момента образцов от циклически изменяющегося магнитного поля $m(H)$ для систем $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb-Co}$ и $\text{Co}/\text{Tb-Co}$. Эти петли гистерезиса измерены вдоль оси приложения технологического поля, которое задаёт ориентацию ОЛН в слое Tb-Co. Их ступенчатый характер указывает на послойное перемагничивание, а пересечение восходящей и нисходящей ветвей обусловлено тем, что магнитные моменты того и другого магнитомягких слоёв превышают магнитный момент аморфного слоя. В обоих случаях резкие изменения m в области относительно малых полей, соответствующие перемагничиванию магнитомягких слоёв, происходят прежде, чем H достигает нулевого значения. Это свидетельствует о наличии межслойной обменной связи, которую принято называть «отрицательной». Благодаря такой связи в

состоянии технического насыщения образцов между слоями образуется квазидоменная стенка, которая исчезает при перемагничивании магнитомягких слоёв (см. вставки на рис. 6).

Наряду с общими закономерностями перемагничивания плёнок $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb-Co}$ и $\text{Co}/\text{Tb-Co}$ нами обнаружено и заметное различие в зависимостях $m(H)$. Оно проявляется в виде дополнительной ступеньки, высота которой зависит от амплитуды перемагничивающего поля (рис. 7). По всей видимости, данное обстоятельство связано с некоторым перемешиванием основных слоёв. Оно приводит к образованию в Tb-Co промежуточного субслоя, обогащенного Co и имеющего состав близкий к компенсационному. Однако более определённая интерпретация данной особенности требует дополнительного исследования.

На рис. 8 (кривые 1, 3) показаны приведённые зависимости поля обменного смещения частных петель гистерезиса H_e от температуры для образцов с разными магнитомягкими слоями. Поскольку величина H_e отражает эффективность межслойного взаимодействия, то её увеличение с понижением T в интервале 100 - 300 К показывает, что межслойная связь растёт, причём весьма существенно. На том же рисунке в относительных единицах представлена зависимость спонтанной намагниченности ферромагнитного слоя от температуры. Сравнение показывает корреляцию этих кривых в указанном температурном интервале. При этом нужно отметить, что плёнках Tb-Co основной вклад в температурную зависимость спонтанной намагниченности даёт подрешётка Tb . Это позволяет заключить, что основной вклад в межслойную связь даёт обменное взаимодействие между тербиевой подсистемой ферромагнитного слоя и $3d$ -системой ферромагнитных слоёв.

На эффективность обменного взаимодействия в слоистых структурах можно влиять не только за счёт изменения температуры, но и путём модификации межслойного интерфейса. Такая модификация проводилась нами путем введения ультратонких магнитных (Co) и немагнитных (Ti) прослоек переменной толщины между слоями $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ и Tb-Co , а так же посредством отжига плёночных образцов или селективного отжига магнитомягкого слоя.

В качестве примера на рис. 9 приведены частные петли гистерезиса слоя пермаллоя, характерные для образцов с разной толщиной прослойки Ti . Как можно видеть, введение относительно тонкой прослойки изменяет тип петли гистерезиса. Петля из

прямоугольной переходит в наклонную, практически безгистерезисную, при этом наблюдается некоторое возрастание H_c . Аналогичное изменение формы петли наблюдалось при снижении температуры образца до 100 К и проведении отжига при 75 °С, что позволяет сделать заключение о неустойчивости магнитного интерфейса свежесажженной пленки. При номинальной толщине прослойки 1 нм, петля гистерезиса по виду вновь становится близкой к прямоугольной, увеличивается H_c и пропадает смещение частной петли. Такое поведение, по всей видимости, является простым следствием практически полного исчезновения межслойной связи.

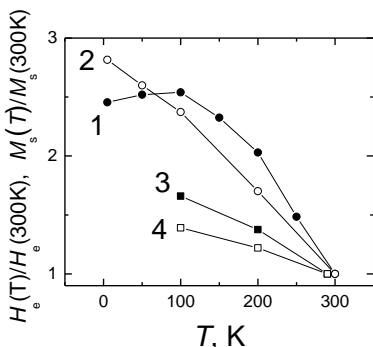


Рис. 8 – Температурные зависимости приведённых величин поля обменного смещения (1,3) и спонтанной намагниченности (2,4) для плёнок $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb}_{29}\text{Co}_{71}$ (1,2) и $\text{Co}/\text{Tb}_{27}\text{Co}_{73}$ (3,4).

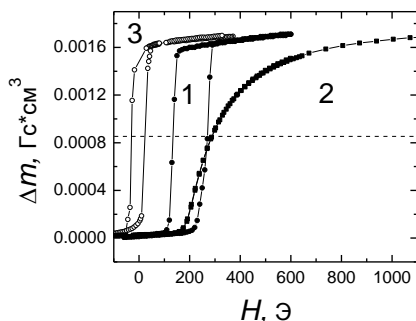


Рис. 9 – Петли гистерезиса слоя пермаллоя, измеренные вдоль ОЛН при комнатной температуре на образцах с разной толщиной прослойки Ti:

- 1 – $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb}_{29}\text{Co}_{71}$;
- 2 – $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Ti}(0,7\text{нм})/\text{Tb}_{29}\text{Co}_{71}$;
- 3 – $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Ti}(1,0\text{нм})/\text{Tb}_{26}\text{Co}_{74}$.

Пунктирной линией обозначен уровень, на котором определялось поле смещение петель гистерезиса.

Полные и частные петли гистерезиса, измеренные на образцах $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Co}/\text{Tb-Co}$, оказались качественно схожи с таковыми для плёнок с прослойкой Ti. При этом роста поля обменного смещения на частных петлях не наблюдалось, и, более того, увеличение толщины прослойки Co в указанном диапазоне привело только к уменьшению H_c . Можно предположить, что кобальт в определённой степени блокирует участие в межслойном обмене тербиевой подсистемы, роль

которой, как показали температурные исследования плёнок $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Tb-Co}$, оказывается весьма заметной.

Температурные зависимости гистерезисных свойств слоя пермаллоя в образцах с прослойками Co разной толщины приведены на рис. 10. Ход кривых $H_c(T)$ и $H_e(T)$ для образцов с $L_{\text{Co}} = 0,3$ и $0,8$ нм во многом совпадает с аналогичными зависимостями для плёнок с прослойками Ti. Но имеют место и некоторые различия. Во-первых, увеличение H_e с понижением температуры в плёнках $\text{Tb}_{26}\text{Co}_{74}/\text{Co}(L_{\text{Co}})/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ происходит менее интенсивно, чем в плёнках $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}/\text{Ti}(L_{\text{Ti}})/\text{Tb}_{26}\text{Co}_{74}$. Во-вторых, введение прослойки Co не устраняет немонотонности в изменении H_e с температурой, как это наблюдалось в случае прослойки Ti. Последнее обстоятельство характеризует обменную связь при наличии прослойки Co как достаточно сильную, чтобы отражать в пермаллое неоднородность магнитной структуры аморфного слоя.

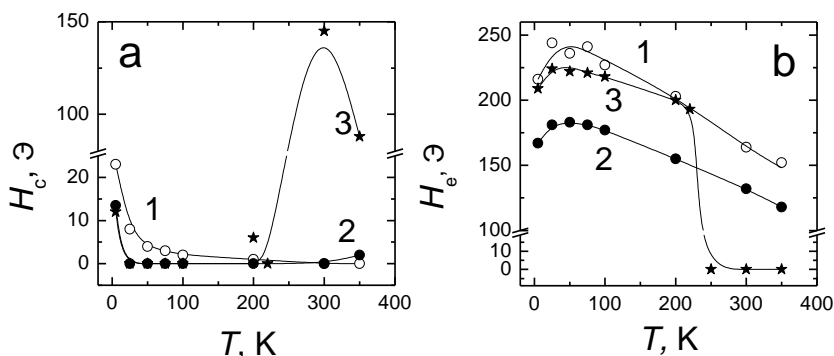


Рис. 10 – Температурные зависимости коэрцитивной силы (а) и поля магнитного смещения (б) магнитомягкого слоя в плёнках $\text{Tb}_{29}\text{Co}_{71}/\text{Co}(L_{\text{Co}})/\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ с различной толщиной прослойки Co: 1 – 0,3; 2 – 0,8; 3 – 1,5 нм.

В плёнке с $L_{\text{Co}} = 1,5$ нм при $T > 200$ К происходит существенная температурная трансформация гистерезисных свойств (кривые 3 на рис. 10), что обусловлено переходом от послойного перемагничивания к перемагничиванию в едином цикле. В области низких температур этот образец ведёт себя подобно плёнкам с прослойками меньшей толщины. Представляет интерес тот факт, что с увеличением толщины прослойки общий уровень поля обменного смещения меняется

немонотонно. Так, в области температур, не превышающих 100 К, наибольшее значение H_e соответствует образцу с $L_{Co} = 0,3$ нм, далее в порядке убывания величины H_e следуют образцы с $L_{Co} = 1,5$ нм и $L_{Co} = 0,8$ нм. Для выяснения причин отмеченной особенности нужны дополнительные целенаправленные исследования. При этом нельзя исключать того, что определённую роль в этом играют небольшие вариации состава аморфного слоя, которые могут иметь место от образца к образцу (прецизионное определение состава в данном случае было затруднено наличием прослойки Co).

В заключительной части главы описано сравнительное исследование устойчивости гистерезисных свойств двухслойных сред с модифицированным интерфейсом к термической обработке. На рис. 11 представлены зависимости поля обменного смещения и коэрцитивной силы магнитомягкого слоя от температуры накопительного ступенчатого отжига T_a , проведенного в вакуумной камере при давлении остаточных газов не более 10^{-6} мм.рт.ст.

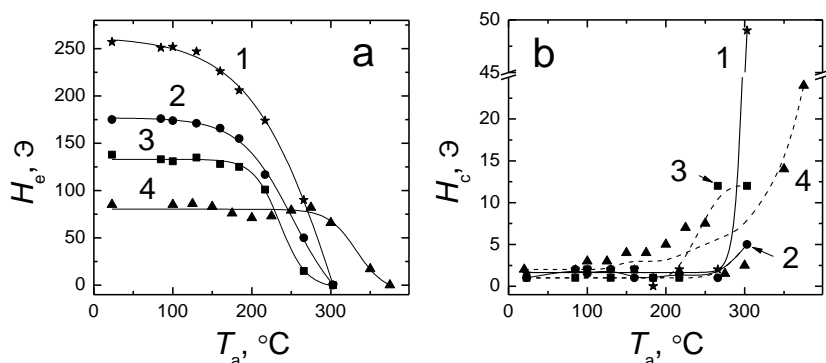


Рис. 11 – Зависимости поля обменного смещения H_e (а) и коэрцитивной силы H_c (б) слоя пермаллоя от температуры ступенчатого отжига, полученные на пленках следующих типов:

1 – $(Fe_{20}Ni_{80})_a/Tb_{28}Co_{72}$; 2 – $Fe_{20}Ni_{80}/Co(0,8nm)/Tb_{27}Co_{73}$;

3 – $Tb_{27}Co_{73}/Fe_{20}Ni_{80}$; 4 – $Fe_{20}Ni_{80}/Ti(0,7nm)/Tb_{29}Co_{71}$.

Анализ представленных зависимостей показывает, что исходная величина поля обменного смещения широко варьируется в образцах разных типов. В то же время для большинства из них характер изменения $H_e(T_a)$ оказался одинаковым: обменная связь остается стабильной до температур отжига $T_a \sim 150$ °C, затем она достаточно резко уменьшается и полностью разрушается после отжига при

температуре около 300 °С. Исключением является образец с прослойкой Ti. Для него H_c практически не изменяется вплоть до $T_a = 250$ °С. То есть обменное смещение данного типа плёнок проявляет наибольшую термоустойчивость. В то же время, по сравнению с образцами других типов, для них свойственен более высокий уровень магнитного гистерезиса и более интенсивное его нарастание по мере повышения температуры отжига.

Для выяснения причин деградации магнитных свойств магнитомягкого слоя в результате отжига нами был выполнен рентгеноструктурный анализ основных слоев в составе пленки Tb₂₇Co₇₃/Fe₂₀Ni₈₀. В результате было установлено, что заметные структурные изменения в образце начались лишь при температурах около 400 °С. Они состояли в росте кристаллитов в слое пермаллоя, тогда как слой Tb-Co оставался рентгеноаморфным. Отсюда было сделано заключение о том, что изменение гистерезисных свойств, наблюдающееся при $T_a < 400$ °С, скорее всего связано с структурно-химическими преобразованиями в интерфейсной области. Для проверки этой гипотезы нами были получены специальные образцы Tb₂₇Co₇₃(5нм)/Fe₂₀Ni₈₀(5нм) и Tb₂₇Co₇₃(5нм)/Ti(0,7нм)/Fe₂₀Ni₈₀(5нм) на стеклянных и кремниевых подложках для проведения анализа термоинициированной межслойной диффузии методом GIXRF. На образцах осажденных на разные подложки результат оказался одним и тем же: после отжига при 250 °С межслойная диффузия наблюдалась на образцах без прослойки и не была обнаружена на образцах с прослойкой Ti. Принимая во внимание полученные данные, а так же корреляцию между наблюдаемой диффузией и изменением магнитных свойств при отжиге, можно сделать вывод о том, что деградация гистерезисных свойств связана с межслойной диффузией в интерфейсной области. При этом ультратонкая прослойка Ti выступает в качестве диффузионного барьера и, тем самым, позволяет повысить термостабильность свойств функциональной среды.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Отработана методика определения концентрационных зависимостей атомных магнитных моментов в аморфных плёнках бинарных сплавов редкоземельных элементов с Co. Показано, что в системе Tb-Co имеет место эффективное уменьшение атомного магнитного момента Tb с увеличением содержания редкоземельного элемента. Его

интенсивность зависит от способа получения плёнок, что связывается с особенностями концентрационного изменения дисперсии локальных моментов Tb в рамках сперимагнитной структуры.

2. Показано, что аморфные плёнки RE-Co (RE=Gd, Tb) в основном состоянии обладают значительной магнитной восприимчивостью в высоких полях. В плёнках Gd-Co, обладающих перпендикулярной анизотропией, она обусловлена деформацией коллинеарной ферримагнитной структуры. В плёнках Tb-Co независимо от характера анизотропии восприимчивость формируется за счёт вращения результирующих магнитных моментов в элементах стохастической структуры в области средних магнитных полей (до 20 кЭ) и деформации сперимагнитной структуры в области более высоких полей.

3. Установлено, что наведённая магнитная анизотропия аморфных плёнок Tb-Co имеет немагнитострикционное происхождение, и критическую роль в её формировании играет технологическое магнитное поле. Предполагается, что определяющий вклад в наведённую анизотропию вносит одноионная анизотропия Tb, которая возникает из-за определённого атомного упорядочения, инициируемого обменным взаимодействием свежесозданных атомов Tb с уже сформировавшейся и намагничённой плёнкой.

4. Установлена однозначная корреляция между величиной поля обменной связи и магнитным моментом тербиевой подсистемы аморфного слоя в плёночных структурах Fe₂₀Ni₈₀/Tb-Co и Co/Tb-Co, что указывает на определяющую роль взаимодействия 3d-Tb в межслойном обмене. Причиной этого может быть косвенный характер указанного взаимодействия, которое на межслойных интерфейсах, вероятно, является более эффективным, чем прямой 3d-3d обмен.

5. Установлены закономерности необратимого изменения поля одноподвижной анизотропии и коэрцитивной силы плёнок типа Fe₂₀Ni₈₀/Tb-Co под действием термической обработки. С привлечением данных прямого измерения профилей элементного состава, выполненного методом GIXRF, показано, что главной причиной указанных изменений является взаимодиффузия контактирующих слоёв. Найдено, что ультратонкая прослойка Ti является эффективным барьером для термоинициированной межслойной диффузии и обеспечивает значительное расширение интервала термической устойчивости поля обменного смещения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных перечнем ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. Балымов К.Г., Васьковский В.О., Свалов А.В., Степанова Е.А., Кулеш Н.А.. Особенности перемагничивания пленок Tb-Co/Fe₁₉Ni₈₁ с однонаправленной анизотропией// ФММ.- 2010.- Т. 110(6).- С. 550–555.
2. Васьковский В.О., Балымов К.Г., Ювченко А.А., Свалов А.В., Сорокин А.Н., Кулеш Н.А., Магниторезистивная среда Fe₁₉Ni₈₁/Tb-Co с внутренним магнитным смещением// ЖТФ.- 2011.- Т.81(7).- С.83-87.
3. Васьковский В.О., Балымов К.Г., Свалов А.В., Кулеш Н.А., Степанова Е.А., Сорокин А.Н. Магнитная анизотропия аморфных пленок Tb–Co// ФТТ.- 2011.- Т.53(11).- С. 2161-2168.
4. Собина Е.П., Васьковский В.О., Медведевских С.В., Цай И.С., Степанова Е.А., Лепаловский В.Н., Балымов К.Г., Кулеш Н.А., Ювченко А.А. Создание стандартных образцов электрических и магнитных характеристик нанопокрывтий пермаллоя на кремнии// Стандартные образцы.- 2012.- №1.- С. 33-42.
5. Kulesh N.A., Balymov K.G., Sorokin A.N., Vas'kovskiy V.O. Influence of permalloy layer and Ti spacer thicknesses on magnetic and magnetoresistive properties of Fe₁₉Ni₈₁/Ti/Tb-Co films// Solid State Phenomena.- 2012.- Vol. 190.- P. 451-454.
6. Васьковский В. О., Свалов А. В., Балымов К. Г., Кулеш Н.А. Влияние отжига на магнитную анизотропию и гистерезисные свойства пленочных структур, содержащих аморфные слои Tb-Co// ФММ.- 2012.- Т. 113(9).- С. 908-912.
7. Собина Е.П., Медведевских С.В., Казанцев В.В., Васильев А.С., Васьковский В.О., Лепаловский В.Н., Кулеш Н.А., Неудачина Л.К., Морозова М.В., Ювченко А.А. Создание стандартных образцов состава, толщины и поверхностной плотности нанопокрывтий на кремнии// Заводская лаборатория. Диагностика материалов.- 2012.- Т. 78(8).- С. 64-68.
8. Villar Alzola N., Svalov A.V., Kulesh N.A., Mayura N.S., Larrañaga A., Kurlyandskaya G.V. Structure and magnetic properties of FeNi/Ti sputtered multilayers// European Physical Journal Web of Conferences.- 2013.- Vol. 40.- P. 17002(4).
9. Кулеш Н.А., Собина Е.П., Васьковский В.О., Коротнев М.О. Особенности градуировки рентгенофлуоресцентного спектрометра с

полным внешним отражением “Nanohunter” с использованием стандартных образцов растворов элементов// Стандартные образцы.- 2013.- № 4.- С. 25-29.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chaudhari P., Cuomo J.J., Gambino R.J. Amorphous metallic films for magneto-optic applications// Appl. Phys. Lett.- 1973.- Vol. 22(7).- P. 337-339.
2. Hansen P., Clausen C., Much G., Rosenkranz M. and Witter K. Magnetic and magneto-optical properties of rare-earth transition-metal alloys containing Gd, Tb, Fe, Co// J. Appl. Phys.- 1989.- Vol. 66.- P. 756-767.
3. Mizoguchi T., Cargill G.S. Magnetic anisotropy from dipolar interactions in amorphous ferrimagnetic alloys// J. Appl. Phys.- 1979.- Vol. 50(5).- P. 3570 – 3582.
4. Okamine S., Ohta. N., Sugita Y. Perpendicular anisotropy in rare earth-transition metal amorphous films prepared by dual ion beam sputtering// IEEE Trans. Magn.- 1985.- Vol. 21(5).- P. 1641-1643.
5. Lin M.-S., Lai C.-H., Liao Y.-Y., Wu Z.-H., Huang S.-H., and Jiang R.-F. Perpendicular giant magnetoresistance composed of CoPt. multilayer and CoFe TbCo// J. Appl. Phys.- 2006.- Vol. 99.- P. 08T106.
6. Smith N., Cain W.C. Micromagnetic model of an exchange coupled NiFe-TbCo bilayer// J. Appl. Phys.- 1991.- Vol. 69(4).- P. 2471-2479.
7. Ducloux O., Park J.W., Tiercelin N., Pernod P., Preobrazhensky V., Hamon M., Sakai Y., Fujita H. MEMS resonators actuated by TbCo/FeCo nanostructured magnetostrictive multilayers in liquid environment// Transducers 2009, Denver, CO, USA.- P. 1019-1022.
8. Tiercelin N., Dusch Y., Klimov A., Giordano S., Preobrazhensky V., and Pernod P. Room temperature magnetoelectric memory cell using stress-mediated magnetoelastic switching in nanostructured multilayers// Appl. Phys. Lett.- 2011.- Vol. 99.- P. 192507.
9. Betz J., Mackay K., Givord D. Magnetic and magnetostrictive properties of amorphous Tb(1-x)Co_x thin films// JMMM.- 1999. Vol. 207.- P. 180-187.
10. Malozemoff A.P., Williams A.R., Terakura K., Moruzzi V.L., Fukamichi K. Magnetism of amorphous metal-metal alloys // JMMM.- 1983.- Vol. 35(1-3).- P. 192-198.